

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **12** (1984/1985)

Številka **1**

Strani 54-59

Zvonko Trontelj:

KAKO DOSEŽEMO NIZKE TEMPERATURE

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/12/694-Trontelj.pdf>

© 1984 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2009 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

KAKO DOSEŽEMO NIZKE TEMPERATURE

V prvi lanske številki smo v članku J. Strnada (Presek XI, 1. števil., str. 34) lahko prebrali, kako so fiziki pred več kot tristo leti začeli meriti temperaturo, kako so nastali termometri in kako so vpeljali temperaturne lestvice. Ravno tako zanimivo si je ogledati, kako dosežemo zelo visoke ali zelo nizke temperature in kako jih izmerimo. V teh smereh raziskujejo fiziki tudi v današnjem času. Tokrat si na kratko oglejmo del fizike zelo nizkih temperatur.

Kako dosežemo nizke temperature? Zelo preprosto, boste rekli, saj imamo doma vsi hladilnike in zamrzovalne skrinje in v njih je zelo hladno. Vendar v teh hladilnikih ne dosežemo posebno nizkih temperatur: v najbolj hladnih je približno -33°C (240 K), delujejo pa na enakih osnovah kot hladilne naprave, ki dosežejo veliko nižje temperature. In katera je najnižja temperatura, ki so jo dosegli? boste takoj vprašali. Le počasi!

Fiziki so ugotovili, da narašča nered v sistemu z velikim številom delcev, npr. v plinu, ki ga sestavljajo molekule, če pri konstantnem tlaku dvigamo temperaturo. Nered lahko povežemo s termodinamično količino, ki ji pravimo *entropija**. Čim večji je nered, tem večja je entropija. Zato lahko rečemo, da je ohlajanje povezano z zmanjševanjem nereda in s tem z zmanjševanjem entropije. Entropija sistema plinskih molekul pa ni odvisna samo od temperature, ampak še od drugih termodinamičnih količin, npr. od *tlaka*. Če spremenimo tlak, se spremeni tudi entropija, kot kaže slika 1.

Kako lahko ohladimo plin, se pravi sistem plinskih molekul? Povečamo tlak od p_1 na p_2 in poskrbimo, da ostane pri tem temperatura plina konstantna. Pravimo, da tlak *izotermno* naraste od p_1 na p_2 . Entropija se pri tem zmanjša. V diagramu (slika 1) smo se premaknili iz točke A v točko B. Zdaj pa znižajmo tlak od p_2 na začetni tlak p_1 , a tako, da ostane entropija konstantna. Plin mora biti pri tem koraku toplotno izoliran. Temu pravimo *adiabatno* razpenjanje plina. Sedaj se tem-

*Nekaj o entropiji in o entropijskem zakonu je v Preseku X, 1. števil., str. 24–35.

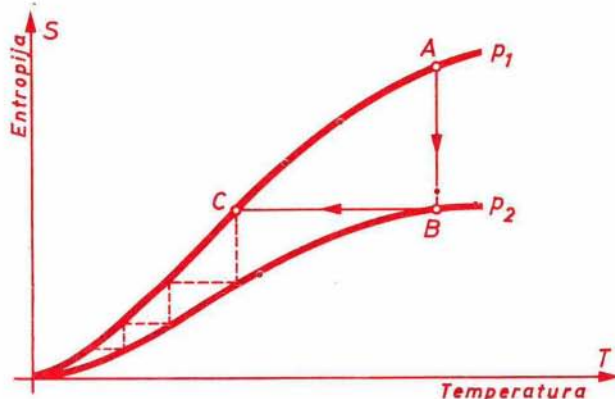
peratura plina znižaja. Ali bi dosegli *absolutno ničlo*, če bi poskus na opisani način ponavljali? Ne. Ko se bližamo absolutni ničli, postaja pri zviševanju tlaka sprememba entropije vse manjša in gre proti nič. (Glej črtkano lomljeno črto na sliki 1). Zato ne moremo doseči v končnem številu korakov absolutne ničle. Za tem spoznanjem tiči *tretji zakon termodinamike*.

Absolutne ničle torej ne moremo doseči, lahko pa se ji približamo. Danes so dosegli že nižje temperature kot 10^{-6} K. Ko plin izotermno stiskamo in nato adiabatno razpenjamo ter to ponavljamo, ga toliko ohladimo, da se začne utekočinjati. V tabeli so navedena vrelišča za nekatere pline pri navadnem zračnem tlaku (1 bar). Helij je plin, ki ima najnižje vrelišče.

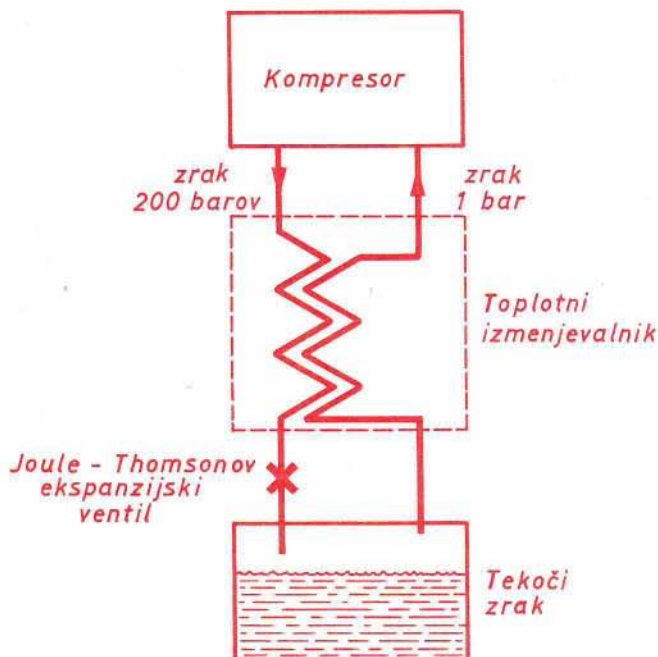
Če znižamo tlak nad tekočino, se vrelišča znižaja (Presek X, 3. štev., str. 127). Tako lahko dosežemo približno 1 K, če znižamo tlak nad tekočim helijem na 0,26 milibara (26 Pa). z odčrpavanjem helijevih par.

Plin	Temperatura vrelišča
kisik (O_2)	90,2 K
dušik (N_2)	77,4 K
vodik (H_2)	20,4 K
helij (He)	4,2 K

Poglejmo, kakšna je *Lindejeva naprava za utekočinjanje plinov*. Glavni sestavni deli take naprave za utekočinjanje zraka so (slika 2): *kompresor*, ki stisne zrak na 200 barov (20 MPa). Nato gre zrak skozi splet cevi –



Slika 1: Diagram kaže potek ohlajanja plina z izotermnim stiskanjem (A → B) in adiabatnim razpenjanjem (B → C)



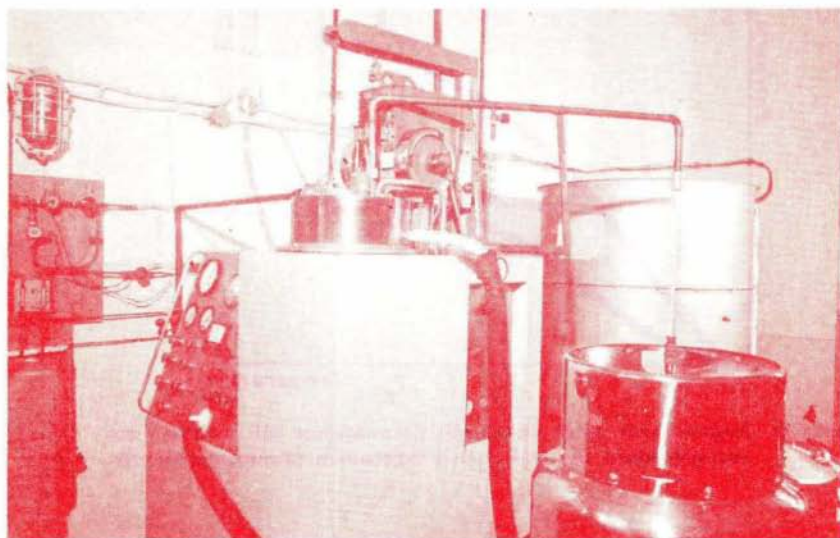
Slika 2: Shema Lindejevega utekočinjevalnika zraka

toplotni izmenjevalnik, kjer se že deloma ohladi. Končno se zrak razpne skozi *Joule–Thomsonov ekspanzijski ventil* na navadni zračni tlak 1 bar (100 kPa). Pri tem se toliko ohladi, da se ga del utekočini, preostali ohlajeni zrak pa se vrača v kompresor in spotoma v toplotnem izmenjevalniku ohlaja stisnjeni zrak. To pot zrak krožno ponavlja. Glej tudi Presek X, 3. števil., str. 124–135.

Tako je prvi utekočiniel zrak nemški fizik Karl Linde leta 1895. Naprave za utekočinjanje vodika in helija delujejo lahko v več stopnjah, imajo pa iste glavne elemente, kot smo jih omenili pri Lindejevem utekočinjevalniku zraka. Res pa je, da so zahteve glede toplotne izolacije, vakuumskega tesnenja, zračnosti pri gibljivih delih pri utekočinjevalnikih helija strožje. Helij je prvi utekočiniel holandski fizik Kamerlingh Onnes leta 1908 v Leidnu. Tedaj šele se je v fiziki lahko začelo raziskovalno delo pri nizkih temperaturah. Najuspešnejši utekočinjevalniki helija so nastali po predlogi, ki jo je naredil ruski fizik Peter Kapica 1934 v Angliji in jo je izpopolnil leta 1947 Collins v ZDA. To izvedbo utekočinjevalnika za helij imamo tudi v Ljubljani na Institutu J. Stefan (slika 3).

Še nižje temperature dosežemo tako, da spreminjamo namesto tlaka

plina zunanje magnetno polje, v katero damo primerno paramagnetno sol. Temu pravimo *magnetno ohlajanje*. V molekuli paramagnetne soli se gibljejo elektroni. Nekatere od njih lahko opišemo kot drobne *magnetnice*.

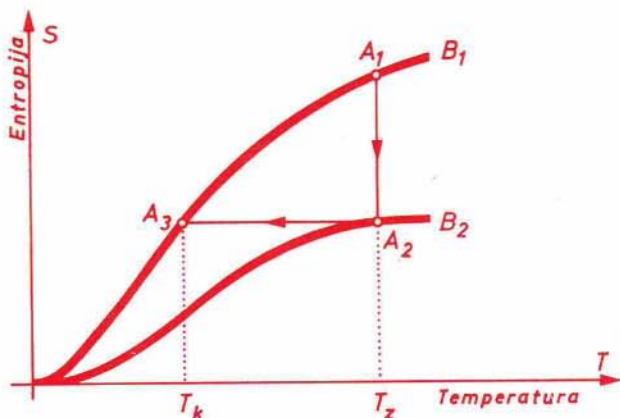


Slika 3: Utekočinjevalnik helija na Institutu J. Stefan v Ljubljani

Tako si smemo poenostavljeno predstavljati kristal paramagnetne soli kot množico magnetnic, na katere deluje zunanje magnetno polje. In kako poteka magnetno ohlajanje? Največkrat vzamemo za hladilno snov paramagnetno sol cerov magnezijev nitrat (CMN), ki ga najprej ohladimo s tekočim helijem pod znižanim tlakom na 1 K. Nato CMN pri tej temperaturi izotermno namagnetimo. Pri tem se uredijo v CMN magnetnice v smeri zunanjega magnetnega polja. Zato se zniža entropija sistema magnetnic. Na sliki 4, ki je podobna sliki 1, smo prišli iz točke A_1 v točko A_2 . Potem toplotno izoliran sistem magnetnic adiabatno razmagnetimo. Na sliki 4 smo se premaknili iz točke A_2 v A_3 . Ob adiabatnem razmagnetanju se paramagnetna sol ohladi na nekaj tisočink K, odvisno od začetne gostote magnetnega polja, ki ga uporabimo, in od razmer v notranjosti kristala, ki jih opiše *notranje magnetno polje*. Končna temperatura je enaka:

$$T_k = T_z \frac{B_{\text{int.}}}{B} \quad (1)$$

T_z pomeni začetno temperaturo, B začetno gostoto magnetnega polja, s katerim namagnetimo CMN, in B_{int} gostoto notranjega magnetnega polja v CMN.



Slika 4: Diagram kaže potek ohlajevanja paramagnetne soli z izotermnim namagnetjenjem ($A_1 \rightarrow A_2$) in z adiabatnim razmagnetjenjem ($A_2 \rightarrow A_3$)

S spreminjanjem zunanjega magnetnega polja lahko ohladimo tudi sistem "*jedrskih magnetnic*" pri nekaterih kovinah. Za ohlajanje so zelo primerna atomska jedra bakra. Jedro atoma bakra se v zunanjem magnetnem polju obnaša podobno kot drobna magnetnica, ki pa je še veliko bolj drobna in manj učinkovita od elektronske magnetnice, o kateri smo govorili prej. Zaradi tega je tudi notranje magnetno polje v kristalu bakra, če upoštevamo samo jedrske magnetnice, kake tisočkrat šibkejše kot notranje polje v kristalu CMN. Iz enačbe (1) vidimo, da bomo z adiabatnim razmagnetjenjem sistema jedrskih magnetnic dobili še nižje temperature, kot smo jih dosegli z adiabatnim razmagnetjenjem sistema elektronskih magnetnic. Prvo uspešno magnetno ohlajanje atomskih jedr bakra je naredil Nicolas Kurti s sodelavci leta 1959 v Oxfordu. Dosegli so okrog 10^{-6} K. Danes tako že dosežejo temperaturo bakrovih jedr $5 \cdot 10^{-8}$ K. Začetna temperatura mora biti okrog 10^{-3} K, jedra bakra pa namagnetijo izotermno z magnetnim poljem z gostoto 8 teslov.

Obe vrsti magnetnega ohlajanja lahko naredimo samo enkrat in ju ne moremo krožno ponavljati. Dosežene temperature trajajo zaradi dovajanja toplote iz okolice le omejen čas, ki je za veliko eksperimentov prekratek.

Za dalj časa dosežemo zelo nizke temperature z *razredčevalnim hladilnikom*, ki je bil prvič narejen pred 15 leti. V tem hladilniku je mešani-

ca lažjega in težjega helijevega izotopa: ^3He in ^4He . (V naravnem heliju pride le na vsake 10^7 atomov ^4He en atom ^3He .) Pri temperaturi malo pod 1 K se mešanica obeh izotopov loči v dve fazi: ena je čisti tekoči ^3He , druga pa vsebuje nekaj več kot 6 % ^3He , raztopljenega v tekočem ^4He . Ker je faza, ki je bolj bogata s ^3He lažja, splava nad fazo, ki ima manj ^3He . Sistem se ohladi, zaradi prehajanja atomov ^3He preko meje obeh faz. Nekaj podobnega se dogaja pri izparevanju tekočin, ko molekule prehajajo iz tekoče faze v plinasto. V razredčevalnem hladilniku lahko vzdržujejo temperaturo nekaj tisočink K.

Na kratko smo opisali osnove važnejših metod, ki jih uporabljamo za doseganje nizkih in najnižjih temperatur. O tem, kako te temperature merimo in katere pojave opazimo pri njih, pa kdaj drugič.

Zvonko Trontelj